نشریهٔ مهندسی عمران فردوسی DOI: 10.22067/jfcei.2021.61272.0 سال سی و سوم، شمارهٔ چهار، ۱۳۹۹

مطالعه آزمایشگاهی مشخصات مکانیکی و دوام بتن حاوی سنگدانه بتن بازیافتی و زئولیت*

مقاله پژوهشی

مسعود سعادت خوش[۱] مهدی آرزومندی[۲] شقایق افشار[۳]

چکیده در سال‌های اخیر توسعه استفاده از بتن در صنعت ساختمان باعث افزایش آلودگی گازهای گلخانه‌ای ناشی از تولید سیمان شده است و از طرفی افزایش تولید نخاله‌های ساختمانی و نبود مکان مناسب جهت دفن این زباله ها، باعث افزایش آلودگی محیط زیست گردیده است . امروزه استفاده از مواد بازیافتی و پوزولان‌ها در راستای کاهش هزینه‌های جاری و همچنین کاهش یا حذف مشکلات زیست محیطی به یکی از مباحث مورد علاقه اکثر محققین تبدیل شده است. در این پژوهش امکان استفاده از زئولیت و همچنین نخاله بتن بازیافتی به عنوان درصدی از سنگدانه‌های مصرفی در بتن مطالعه شده است. برای این منظور از ۱۴ طرح اختلاط (۲۸۰ آزمونه) استفاده گردید و نقش جایگزینی درصدهای مختلف سنگدانه بازیافتی ریزدانه، درشت‌دانه و ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه (۱۵ و ۳۰ درصد) در بتن همراه با ۱۰ درصد زئولیت بر روی مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت در برابر نفوذ یون کلراید و مقاومت ویژه الکتریکی بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت بر اساس نتایج به دست آمده، در بین نمونه‌های بازیافتی نمونه با ۱۵ درصد جایگزینی درشت دانه بازیافتی همراه با زئولیت، بیشترین درصد افزایش مقاومت فشاری وکششی، بتن با ۱۵ درصد سنگدانه بازیافتی ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه همراه با زئولیت بیشترین افزایش مقاومت الکتریکی و مخلوط بتنی با جایگزینی ۱۵ درصد سنگدانه بازیافتی درشت‌دانه و ۱۰ درصد جایگزینی پوزولان زئولیت، بیشترین کاهش نرخ نفوذ یون کلراید را نسبت به بتن معمولی ثبت کرده است.

واژه‌های کلیدی سنگدانه بتن بازیافتی، زئولیت، مشخصات مکانیکی بتن بازیافتی، دوام بتن بازیافتی.

An Experimental Study on Mechanical properties and Durability of Concrete with Recycled Aggregate Concrete and Zeolite

M. saadatkhosh M.arezoumandi Sh. Afshar M. Haji mahdi

Abstract *Recently, there has been an increasing trend toward the use of sustainable materials. Sustainability helps the environment by reducing the consumption of non-renewable natural resources. Concrete – the second most consumed material in the world after water – uses a significant amount of non-renewable resources. Efforts aimed at producing environmentally friendly concrete can play a major role in securing sustainable construction. Candidate technologies for sustainable concrete materials include the incorporation of supplementary cementitious materials (SCMs) as a partial replacement for Portland cement; as well as recycled materials in concrete production. As a result, an experimental investigation was conducted to study the mechanical properties and durability of concrete constructed with 15% and 30% recycled aggregate concrete as well as 10% zeolite. This experimental program consisted of fourteen mix designs. The compressive strength, split tensile strength, electrical resistivity and chloride ion penetration of recycled concrete mixes were compared with the conventional concrete. Results of this study show that the zeolite and recycled aggregate concrete increased compressive strength, split tensile strength and electrical resistivity also decreased chloride ion penetration of concrete. To overcome inferior durability and mechanical properties of recycled mixes, zeolite (10%) has been added to recycled mixes. Results of the mixes including both recycled aggregate concrete and zeolite show superior durability (both electrical resistivity and chloride ion penetration) compared with the conventional concrete.*

Key Word Recycled aggregate concrete, Zeolite, Mechanical properties of recycled concrete, Durability of recycled concrete.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷-۱۰/۱۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۲/۱۴ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش، قم.

Email: Masoudsaadatkhosh@gmail.com

(۲) استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش، قم.

(۳) کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهاب دانش، قم.

مقدمه

بتن پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی در دنیا پس از آب است که بر محیط زیست ما اثرگذار بوده و به نوعی آن را شکل می‌دهد [1]. در واقع بتن محصولی است که هم طول عمر بالایی را برای ساختمان‌ها به ارمغان می‌آورد و هم در مصرف انرژی صرفه جویی می‌شود. بشر هر روز به دنبال تغییر است، تغییر در ساختمان‌ها منجر به ایجاد برخی تخریب‌ها و به دنبال آن به وجود آمدن حجم بسیار بالایی ضایعات ساختمانی می‌شود که بخش عمده آن‌ها، از جمله بخش‌های بتنی، قابل بازیافت و استفاده مجدد در ساختمان‌ها هستند.

زباله ساختمانی حاصل از تخریب بناهای فرسوده بخش عمده ضایعات در جهان را تشکیل می‌دهد به طوری که تنها در آمریکا سالانه بیش از ۳۰۰ میلیون تن زباله از ضایعات ساختمانی تولید می‌شود [1]. با توجه به محدودیت زمین‌های دپو، دفع سنتی این مواد دیگر اقدام قابل قبولی نیست خصوصا در کشورهایی مانند ژاپن که محدودیت زمین وجود دارد این امر بیشتر خود را نشان داده و یکی از راهکارها استفاده مجدد از ضایعات ساختمانی خصوصا بتن‌هایی که سخت تر بوده و مقاومت بهتری دارند، در بتن به عنوان سنگدانه می‌باشد.

یکی از مصالح ساختمانی که ارزش استفاده مجدد و زمینه بازیافت کم هزینه ای دارد، بتن است. این ماده با کمترین دخل و تصرف، بهترین کیفیت و نزدیک‌ترین خواص به مصالح اولیه را می‌تواند داشته باشد و در این زمینه در کشورهای اروپایی اقدامات گسترده‌ای صورت گرفته است. بازیافت بتن عمدتا نیازمند استفاده از تکنیک‌های شکستن و خرد کردن در اندازه‌های مورد نیاز (مثلا در دانه‌بندی سنگدانه مورد استفاده در بتن) است. ضمن اینکه بتن بازیافتی را می‌توان در تولید بلوک‌های سیمانی، کفسازی، جاده‌سازی و حتی بتن سازه‌ای استفاده کرد؛ لذا با توجه به حجم بالای تخریب‌ها، بسیاری از زمین‌هایی که به دپوی ضایعات تبدیل شده‌اند، کاهش پیدا می‌کنند.

تحقیقات مختلف نشان داده‌اند که سنگدانه‌های حاصل از خردکردن بتن در مقایسه با سنگدانه طبیعی جذب آب بیشتر، مدول بالک کمتر، وزن مخصوص‌کمتر، خوردگی بیشتر، جمع شدگی و خزش بیشتر، مقاومت فشاری، کششی و خمشی کمتر، مدول الاستیسیته کمتر و مقاومت در برابر یخ‌زدگی مشابهی دارند [2]. با وجود اینکه سنگدانه‌های بتن بازیافتی باعث کاهش مقاومت و دوام در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی در بتن شده است، اما در بسیاری از کشورهای دنیا به دلیل کمبود منابع طبیعی، حفاظت از محیط زیست و همچنین برخی مسائل اقتصادی استفاده از آنها اجتناب ناپذیر است [3].

کاربرد پوزولان‌های طبیعی مانند زئولیت که در ایران منابع فراوان دارد، هنوز کمتر مورد توجه متخصصین تکنولوژی بتن قرارگرفته است. پودر زئولیت به عنوان یک ماده معدنی، توسط محققین به عنوان جایگزینی مناسب برای سیمان در بتن معمولی مورد توجه قرار دارد [4].

در کشور چین سالانه بیش از ۲۰۰ میلیون تن سیمان تولید می‌شود و به جای بیش از ۲۰ درصد وزن این سیمان تولیدی، زئولیت مخلوط می‌شود. در حال حاضر بیشترین مصرف زئولیت در کشور چین در صنعت تولید سیمان آمیخته می‌باشد. همچنین با توجه به گزارش موسسه تحقیقاتی ROSKI بزرگترین بازار آینده زئولیت در استفاده از آن به عنوان پوزولان به جای قسمتی یا تمام سیمان پرتلند مصرفی در بتن خواهد بود که از خواص مطلوب آن در بهبود خواص مکانیکی بتن گزارش می‌شود [5].

دوام بتن یکی از مهمترین مشخصه های آن است که باید در هنگام طراحی و ساخت بتن، تمهیدات لازمی برای تامین آن در نظر گرفته شود. علاوه بر آن، می‌بایست

با روشهای مناسب علمی، طول عمر خدمت‌دهی سازه-های مختلف بتنی، نحوه رفتار آن‌ها در شرایط مختلف محیطی، وجود خوردگی‌ها و تخریب‌های احتمالی و علل آنها و نحوه تعمیر و زمان انجام آنها مشخص شوند. خوردگی فولاد مدفون در داخل بتن بر اثر نفوذ یون کلراید و پیامدهای آن، یکی از مهمترین انواع خرابی‌های سازه‌های بتن مسلح است که بویژه به دلیل کثرت میزان آن، هر ساله خسارات بسیار زیادی را بر ابنیه بتنی وارد می‌کند. علی رغم تحقیقات فراوانی که در این زمینه صورت گرفته است، اما به دلیل اهمیت فنی و اقتصادی موضوع، هنوز هم بخش عمده ای از تحقیقات مربوط به دوام بتن در این زمینه انجام می‌گیرد. این موضوع در کشور ما نیز، به دلیل جدی بودن مسئله، به ویژه در مناطق حاشیه سواحل و جزایر خلیج فارس و دریای عمان، از اهمیت بیشتری برخوردار است.

عمر خدمت‌دهی طولانی مترادف با دوام در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که دوام تحت یک مجموعه شرایط، لزوما به معنای دوام تحت مجموعه شرایط دیگری نمی‌باشد، به همین دلیل متداول است که هنگام تعریف دوام اشاره ای کلی به محیط نیز بشود. بر طبق تعریف کمیته ۲۱۲ انستیتوی بتن آمریکا (ACI) [6]، دوام بتن سیمان پرتلند، به توانایی آن برای مقاومت در برابر عوامل هوازدگی، حمله شیمیایی، سایش، و یا هر فرآیندی که موجب آسیب دیدگی شود، گفته می‌شود. بنابراین، بتن با دوام، بتنی است که شکل اولیه، کیفیت و قابلیت خدمت‌دهی خود را در شرایط محیطی حفظ کند [7].

بررسی مشخصات مکانیکی مطالعات گذشته

در زمینه مشخصات مکانیکی ساینی و ژئول (۲۰۱۶) در تحقیقات خود نشان داده که استفاده از سنگدانه بتن بازیافتی در بتن موجب کاهش مقاومت فشاری و همچنین افزایش سرعت کاهش مقاومت می‌شود. همچنین آزمایش هایی نیز بر روی مقاومت کششی بتن های حاوی سنگدانه بتن بازیافتی انجام دادند که نشان داده، اگرچه مقاومت کششی بتن‌های حاوی سنگدانه بتن بازیافتی کاهش پیدا می‌کند اما این کاهش به نسبت مقاومت فشاری کمتر است به طوری که در صورت جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه بتن بازیافتی به جای سنگدانه معمولی بدون افزودن پوزولان خاصی، حدود ۱۲ درصد مقاومت کششی کاهش پیدا می‌کند [8].

کارتوکسو و همکاران [9] در تحقیقاتی که بر روی بتن های حاوی مقادیر تا ۱۰۰ درصـــد ســـنگدانه بتن بازیافتی انجام دادند، نـشان داده شد که بتن حاوی ۱۰۰ درصد سنگدانه ریز بتن بازیافتی در سن ۲۸ روز، ۲۰ تا ۲۵ درصد مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن معمولی با نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان یکسان دارد.

نجیمی و همکاران [10] گزارش کردند که مقاومت فشاری بتن شامل ۱۵ و ۳۰ درصد زئولیت در همه سنین از نمونه شـاهد کمتر اسـت. اگرچه درصـد کاهش در سنین انتهایی(۳۶۵روز) کمتر ا ست، این امر می تواند به علت فعالیت پوزولانی باشد.

Vaičiukynienė, D و همکاران [11] در مقاله ای با عنوان سیمان اصلاح شده با مواد پوزولانی مشاهده کردند که ۵ درصد زئولیت تاثیر مثبت بر روی مقاومت فشاری ملات سیمان سخت شده به علت فعالیت های پوزولانی زئولیت و توسعه فاز هیدرو آلومینات در سخت شدگی فرآیند سیمان دارد.

بررسی دوام مطالعات گذشته

در مطالعات گذشته مربوط به دوام بتن، کارتوکسو و همکاران [9] در بررسی نفوذ یون کلراید در بتن‌های حاوی سنگدانه ریز بتن بازیافتی که در آن ۴۰ درصد از این سنگدانه استفاده شده است، به این نتیجه رسیدند که

بتن حاوی ٤٠ درصد ریزدانه بازیافتی به دلیل افزایش اجباری آب در ساخت بتن، افزایش تخلخل و افزایش نفوذ پذیری دارد و در نتیجه بتن ساخته شده عملکرد قابل قبولی در برابر نفوذ کلر نشان نداد.

سمنا و همکاران [12] عمق نفوذ یون کلراید بتن غوطه ور در محلول کلراید سدیم ۳٪ را بررسی نمودند. این نتایج نشان دادند که بتن بازیافتی بدون پوزولان مقاومت کمتری در برابر نفوذ یون کلراید نسبت به بتن با سنگدانه طبیعی داشته است، زیرا حجم خلل و فرج در بتن‌های بازیافتی بیشتر از بتن با سنگدانه طبیعی بوده است. علاوه بر این به این نتیجه رسیدند که یون‌های کلراید نیز می توانند از طریق ناحیه انتقال بین ملات چسبیده و سنگدانه خرد شده قدیمی نفوذ کنند.

Nagrockiene و همکار [13] در سال گزارش دادند که مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب شدن بتن حاوی ۱۰٪ زئولیت طبیعی ۳/۳ برابر بیشتر از نمونه شاهد است.

اسکندری و همکاران [14] در سال افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر و افزایش مقاومت الکتریکی را در بتن دارای ۱۰درصد زئولیت در سنین ۲۸ و ۹۰ روز مشاهده کردند.

هدف این تحقیق، بررسی اثر استفاده توام زئولیت و سنگدانه بازیافتی به عنوان جایگزین درصدی از سنگدانه مورد نیاز، بر مشخصات مکانیکی و دوام بتن می‌باشد. برای بررسی مشخصات مکانیکی از آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی دو نیم شدن و در بررسی دوام از آزمایش های نفوذ تسریع شده یون کلر و مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌های بتنی استفاده شده است.

طبق مطالعات گذشته، درصد بهینه زئولیت در بتن ۱۰٪ جایگزینی سیمان و برای سنگدانه بازیافتی تا ۳۰ درصد جایگزینی با سنگدانه‌های طبیعی، کمترین کاهش مقاومت و دوام نسبت به بتن معمولی را به دنبال داشته است [8-14]. در این پژوهش، اثر توامان جایگزینی پوزولان زئولیت و سنگدانه بازیافتی با درصدهای بهینه، جهت استفاده از بتن‌های دوستدار محیطزیست با مشخصات مکانیکی و دوام بالا مورد بررسی قرار گرفته است.

برنامه آزمایش ها

برای این تحقیق آزمایشگاهی ١٤ طرح اختلاط به شرح زیر ساخته شده‌اند:

۱. نمونه شاهد با سنگدانه‌های طبیعی و فاقد زئولیت (C).
۲. نمونه شاهد با سنگدانه‌های طبیعی همراه با ۱۰ درصد زئولیت (Z).
۳.نمونه با ۱۵ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه فاقد زئولیت (F15).
٤. نمونه با ۱۵ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه همراه با ۱۰ درصد زئولیت (F15Z).
٥. نمونه با ۳۰ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه فاقد زئولیت (F30).
٦. نمونه با ۳۰ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه همراه با ۱۰ درصد زئولیت (F30Z).
۷. نمونه با ۱۵ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی درشت‌دانه فاقد زئولیت (C15).
۸. نمونه با ۱۵ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی درشت‌دانه همراه با ۱۰ درصد زئولیت (C15Z).
۹. نمونه با ۳۰ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی درشت‌دانه فاقد زئولیت (C30).
۱۰. نمونه با ۳۰ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی درشت‌دانه همراه با ۱۰ درصد زئولیت (C30Z).
۱۱. نمونه با ۱۵ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه فاقد زئولیت (T15).
۱۲. نمونه با ۱۵ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه همراه با ۱۰ درصد زئولیت

.(T15Z)

۱۳. نمونه با ۳۰ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه فاقد زئولیت (T30).

۱٤. نمونه با ۳۰ درصد وزنی جایگزینی سنگدانه بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه همراه با ۱۰ درصد زئولیت .(T30Z)

مصالح مصرفی

شن مورد استفاده در این آزمایش با حداکثر بعد ۱۹ میلیمتر و چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از نوع شکسته کوهی (شهر قم) است. همچنین ماسه مصرفی از رودخانه شهر قم و چگالی ۲٤٦۷ کیلوگرم بر متر مکعب است. دانه بندی سنگدانه استفاده شده براساس استاندارد ASTM C29-11 [15] است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول (۱) آمده است. ریزدانه و درشت دانه بازیافتی مورد استفاده، از ضایعات آزمایشگاه‌های بتن شهر قم بوده که به صورت دستی شکسته شده‌اند. دانه‌بندی این مصالح بازیافتی به طور کامل منطبق بر دانه‌بندی و مشخصات سنگدانه طبیعی (فاز ریزدانه ودرشت دانه) می‌باشد. ابر روان کننده (فوق روان کننده) استفاده شده در تحقیق حاضر از نوع پلی کربوکسیلات می‌باشد که براساس کارآیی مدنظر بتن، مورد استفاده قرارگرفته است.آب مورد استفاده در این آزمایش‌ها نیز آب لوله‌کشی شهر قم بوده است.

سیمان مورد استفاده در این تحقیق، سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ براساس استاندارد ASTM C150-11 [16] می‌باشد. همچنین زئولیت مورد استفاده از کارخانه بینالود بوده است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها در جدول (۲) ارائه شده است.

طرح اختلاط

طرح اختلاط‌های بتن مورد آزمایش در این تحقیق مطابق آئین‌نامه ACI 211.1-91 [17] بوده است. جدول (۳) جزئیات طرح‌های اختلاط و مشخصات بتن تازه را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه افزودن زئولیت موجب کاهش کارآیی بتن می‌شود برای جبران این مشکل و نزدیک شدن اسلامپ بتن‌های حاوی زئولیت به اسلامپ بتن‌های دیگر از ابرروان‌کننده استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات فیزیکی سنگدانه‌ها

نوع سنگدانه	درصد جذب آب	چگالی اشباع با سطح خشک (kg/m^3)	حداکثر قطر سنگدانه (mm)
ماسه	۲/۱۹	۲٤٦۷	٤/۷۵
شن	۰/۷۰	۲۷۰۰	۱۹

جدول ۲ مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان و زئولیت

زئولیت	سیمان	ترکیبات شیمیایی(٪) و فیزیکی
٦٦,۹	۲۰/۷	SiO_2
۱۱,٦	٤./۷	AL_2O_3
۱,۰۲	٤/۱	Fe_2O_3
۱,۲	٦۳/۸	CaO
–	۲/۳	SO_3
۱,۲٦	۱/۳	MgO
۲,۳٦	۰/٤	Na_2O_3
۲,٦	۰/٦	K_2O
۱۲,٦	۲/۲	LOi
۲۲۰۰	۳۱۰۰	وزن مخصوص (kg/m^3)
۱۸۰۰	۳۰۸۰	بلین (cm^2/g)

مشخصات مکانیکی بتن

دراین بخش نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی بتن (۷، ۲۸ و ٥٦ روز) بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی‌متر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

جدول ۳ طرح اختلاط (Kg/m^3)

شماره طرح	نام طرح	سیمان	نسبت آب به مواد سیمانی	ابر روان کننده (٪)	شن	ماسه	سنگدانه بازیافتی درشت دانه	سنگدانه بازیافتی ریزدانه	زئولیت	اسلامپ (mm)	وزن مخصوص بتن تازه
۱	C	٤۲٥	۰/٤٥	۰	٦۹۰	۱۰۳٦	۰	۰	۰	۹۱	۲۳٥٦
۲	Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/۸	٦۸۷	۱۰۲۷	۰	۰	٤۳	۱٤۰	۲۳٤۱
۳	F15	٤۲٥	۰/٤٥	۰	٦۸۷	۸۷۱	۰	۱٥۲	۰	۹۲	۲۳٤٥
٤	F15Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/٥	٦۷۹	۸٦۷	۰	۱٤۰	٤۳	۱۲۰	۲۳۲۸
٥	F30	٤۲٥	۰/٤٥	۰	٦۸۱	۷۱۳	۰	۳٥۳	۰	۱۲۸	۲۳۳٥
٦	F30Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/۲٥	٦۷٤	۷۰۹	۰	۲۷٦	٤۳	۱۱۰	۲۳۱٦
۷	C15	٤۲٥	۰/٤٥	۰/۲٥	٦۲٦	۱۱۱۳	۸٥	۰	۰	۱۷۰	۲٤٦٥
۸	C15Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/٥	٥۸۱	۱۰۳۲	۱۰۰	۰	٤۳	۱۲۰	۲۳۳۰
۹	C30	٤۲٥	۰/٤٥	۰	٥٥۰	۱۱۸۸	۱۸۱	۰	۰	۱٤٥	۲٥۹۰
۱۰	C30Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/٥	٤۷۸	۱۰٤٦	۱۹۹	۰	٤۳	۱٤۰	۲۳۲۳
۱۱	T15	٤۲٥	۰/٤٥	۰/۲٥	٥۸۳	۸٦٦	۱۰۰	۱۳۹	۰	۱۳٥	۲۳۳۳
۱۲	T15Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/۷	٥۷٥	۸٦٥	۹۹	۱۳۸	٤۳	۱٤۰	۲۳۱۸
۱۳	T30	٤۲٥	۰/٤٥	۰/۱٥	٤۷۳	۷۰٤	۱۹۷	۲۷٥	۰	۱۳٥	۲۳۱۱
۱٤	T30Z	۳۸۲	۰/٤٥	۰/٥	٤٦۸	۷۰۳	۱۹٥	۲۷۲	٤۳	۱۲۰	۲۲۹٦

آزمایش مقاومت فشاری

در این تحقیق آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷ ، ۲۸ و ٥٦ روز بر اساس ASTM C39-11 [18] انجام شده و نتایج آن در جدول (٤) ارائه شده است.

شکل (۱)، مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱٥ درصد سنگدانه بازیافتی را با نمونه‌های شاهد (بتن معمولی و بتن با ۱۰ درصد زئولیت) مقایسه می‌کند . همانطور که از شکل مشخص است، در سنین بالا (۲۸ و ٥٦ روز) مقاومت فشاری بتن حاوی ۱۰ درصد زئولیت (Z) حدود ۳۰ درصد بیشتر از بتن معمولی (C) می‌باشد. در مورد بتن‌های حاوی ۱٥درصد درشت‌دانه بازیافتی در سن ۲۸ روز نمونه C15 کاهش مقاومت ناچیزی نسبت به بتن معمولی داشته است. اما با افزودن زئولیت به آن (نمونه C15Z) افزایش ۲٥ درصدی نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است.

با بررسی نمونه‌های حاوی ۱٥درصد ریزدانه بازیافتی، نمونه F15 کاهش ۲٥ درصدی مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی را به همراه داشته است. با افزودن زئولیت به این نمونه (F15Z)، ٦ درصد افزایش نسبت به بتن معمولی به‌دست آمده است.

در مورد نمونه‌های با ۱٥ درصد ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی، نمونه T15 کاهش مقاومت فشاری ناچیزی نسبت به بتن معمولی داشته است. با افزودن پوزولان زئولیت به این نمونه (T15Z) مقاومت فشاری آن تقریبا به بتن معمولی نزدیک شده است.

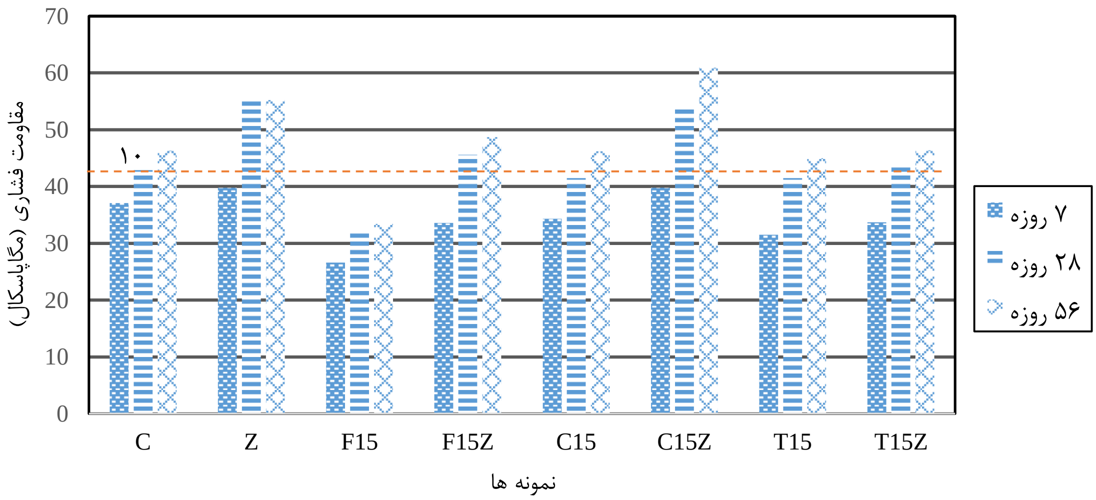
نتایج مربوط به مخلوط‌های حاوی ۳۰ درصد سنگدانه بازیافتی در شکل (۲) نشان داده شده است. برای نمونه با ۳۰ درصد درشت‌دانه بازیافتی (C30) در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی ۱٥ درصد کاهش داشته است. با جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت با سیمان (نمونه C30Z)

حدود ۲۰ درصد افزایش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است. برای نمونه با ۳۰ درصد ریزدانه بازیافتی (F30) کاهش ۳۸ درصدی مقاومت فشاری به همراه داشته است. با اضافه کردن زئولیت به این نمونه (F30Z) مقاومت فشاری تا حدی به بتن معمولی نزدیک شده است؛ برای نمونه‌های با ۳۰ درصد ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی (T30) در سن ۲۸ روز، کاهش ۱۸درصدی مشاهده شده است. از طرفی نمونه T30Z نسبت به بتن معمولی ۵ درصد کاهش داشته است.

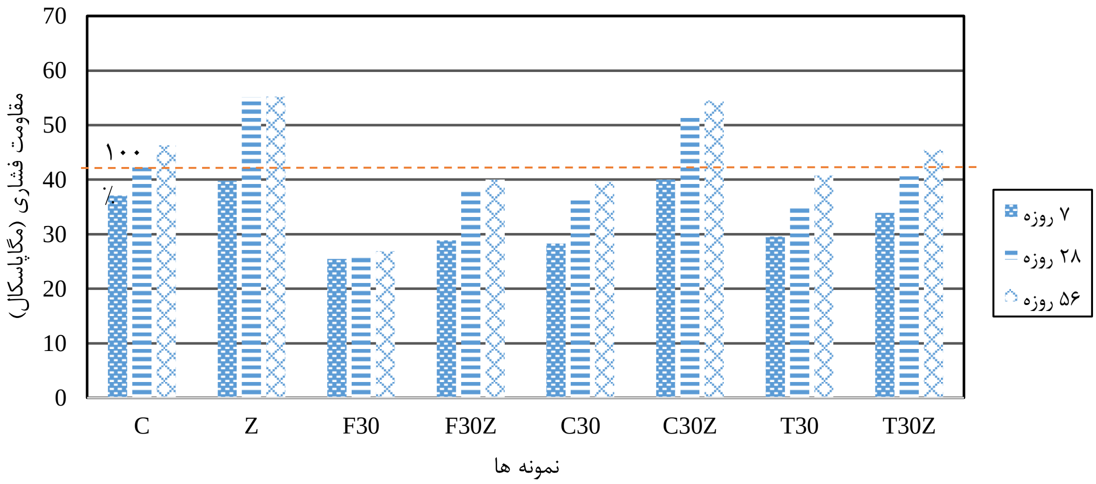
شـــکل های (۳) و (٤) به ترتیب نمودار رشـــد مقاومت فشـــاری نمونه‌های بازیافتی و بتن‌های حاوی زئولیت مورد آزمایش را نشان می‌دهند. همانطور که از شکل‌ها مشخص است در نمونه‌های حاوی سنگدانه بازیافتی با افزایش درصـد جایگزینی سـنگدانه‌ها کاهش مقاومت فشاری را به همراه داشته است. وجود ملات ماسـه و سـیمان بر روی سـنگدانه‌های بازیافتی و اثرات منفی بر روی مشخصات سنگدانه ها عامل اصلی این کاهش مقاومت می‌باشد.

جدول ٤ نتایج آزمایش مقاومت فشاری

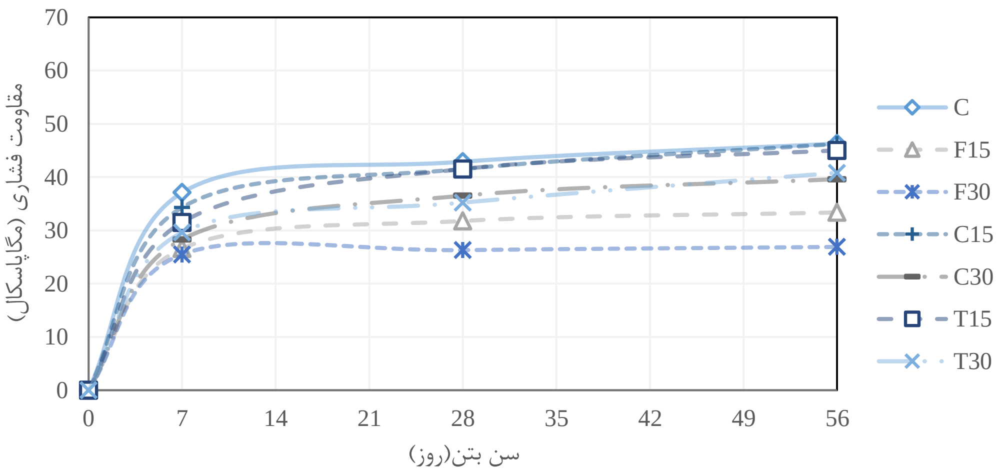
طرح	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	٥٦ روزه
C	۳۷٫۱	٤۲٫۹	٤٦٫۳
Z	۳۹٫۸	٥٥٫۱	٥٥٫۲
F15	۲٦٫٦	۳۱٫۸	۳۳٫٤
F15Z	۳۳٫٦	٤٥٫٦	٤۸٫۷
F30	۲٥٫٥	۲٦٫۳	۲٦٫۹
F30Z	۲۸٫۹	۳۸٫۲	٤۰٫۰
C15	۳٤٫۳	٤۱٫٥	٤٦٫۲
C15Z	۳۹٫۸	٥۳٫۹	٦۰٫۹
C30	۲۸٫۳	۳٦٫٥	۳۹٫٦
C30Z	٤۰٫۰	٥۱٫۸	٥٤٫٥
T15	۳۱٫٥	٤۱٫٥	٤٥٫۰
T15Z	۳۳٫۷	٤۳٫۸	٤٦٫٤
T30	۲۹٫٦	۳٥٫۲	٤۰٫۸
T30Z	۳۳٫۹	٤۰٫٦	٤٥٫٥



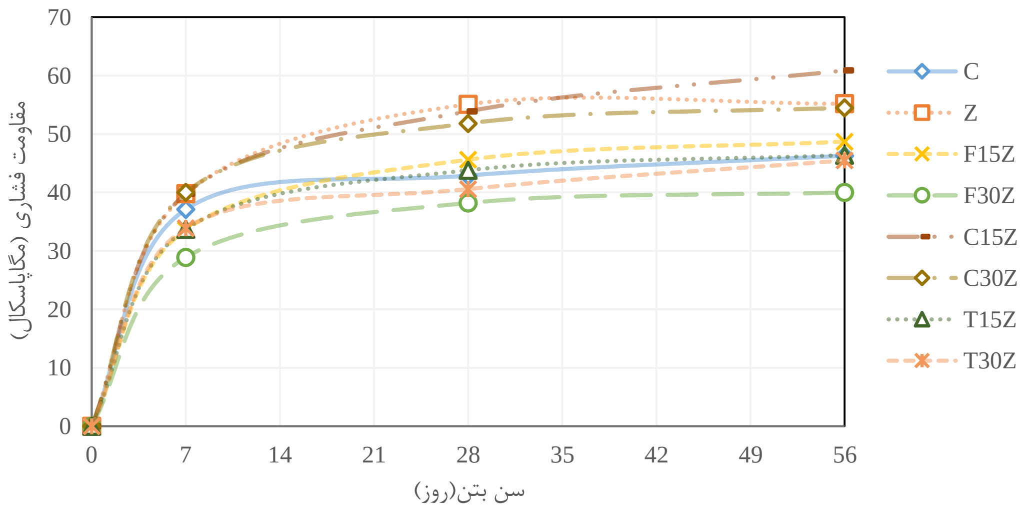
شکل ۱ مقایسه مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۱۵ درصد سنگدانه بازیافتی با نمونه های کنترل



شکل ۲ مقایسه مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۳۰ درصد سنگدانه بازیافتی با نمونه های کنترل



شکل ۳ مقاومت فشاری نمونه های بازیافتی مورد آزمایش



شکل ٤ مقاومت فشاری نمونه های حاوی زئولیت

در نمونه‌های حاوی زئولیت، با افزایش سن مقاومت فشاری افزایش قابل توجهی داشته است؛ به طوری که در نمونه‌های بازیافتی با افزودن زئولیت ضعف بتن‌های بازیافتی با وجود سنگدانه‌های بازیافتی را جبران کرده است. واکنش پوزولانی سیمان و زئولیت باعث افزایش مقاومت و جبران این ضعف بتن شده است.

آزمایش مقاومت کششی شکافتنی

برای ارزیابی مقاومت کششی بتن به طور کلی از سه روش: ۱. آزمایش کشش مستقیم، ۲. آزمایش کشش دو نیم شدن استوانه (شکافتنی)، ۳. آزمایش کشش حاصل از خمش استفاده می‌شود. نتایج این تحقیق از آزمون کشش دو نیم شدن شکافتنی براساس استاندارد-ASTM C496 11 [19] بر روی نمونه‌های مختلف بتن در سنین ۷، ۲۸ و ٥٦ روز به دست آمده است. در جدول (٥) نتایج آزمایش مقاومت کششی شکافتنی مذکور نمونه‌ها ارائه شده‌اند.

شکل (٥) مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱٥ درصد سنگدانه بازیافتی را با نمونه‌های شاهد مقایسه می-کند . همانطور که از شکل مشخص است، در سن ۲۸ روز مقاومت کششی بتن حاوی ۱۰ درصد زئولیت (Z) حدود ۳۰درصد بیشتر از بتن معمولی (C) می‌باشد. در مورد بتن‌های حاوی ۱٥ درصد درشت‌دانه بازیافتی نمونه C15 افزایش مقاومت کششی ۱٥ درصدی نسبت به بتن معمولی داشته است. با افزودن زئولیت به آن (نمونه C15Z) این افزایش به ٤۰ درصد رسیده است.

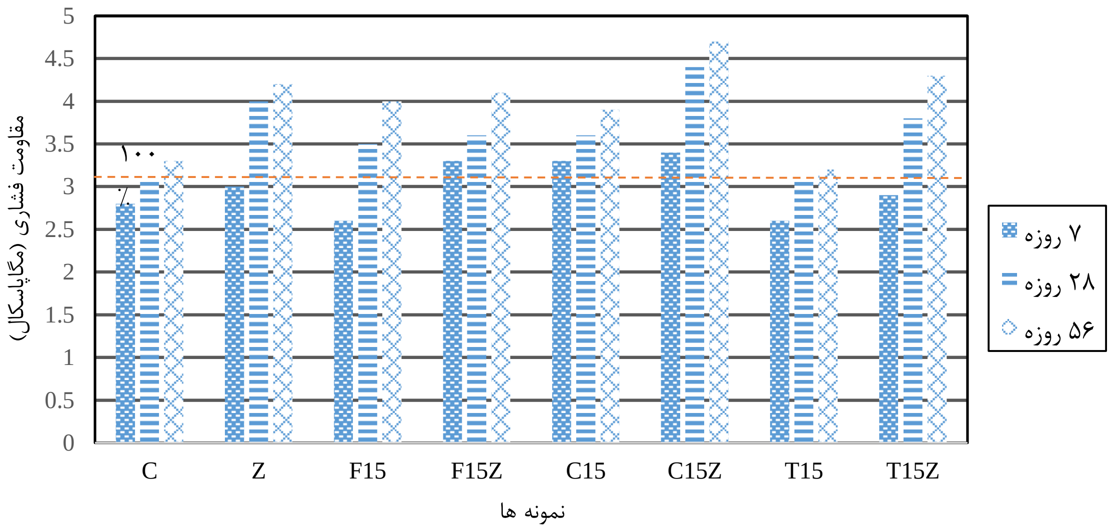
با بررسی نمونه‌های حاوی ۱٥ درصد ریزدانه بازیافتی، نمونه های F15 و F15Z نسبت به بتن C، حدود ۱٥ درصد افزایش داشته‌اند.

در مورد نمونه‌های با ۱٥ درصد ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی، نمونه T15 مقاومت کششی یکسانی نسبت به بتن معمولی داشته است، اما با افزودن پوزولان زئولیت به این نمونه (T15Z) ، مقاومت کششی آن ٦ درصد نسبت به بتن معمولی افزایش پیدا کرده است.

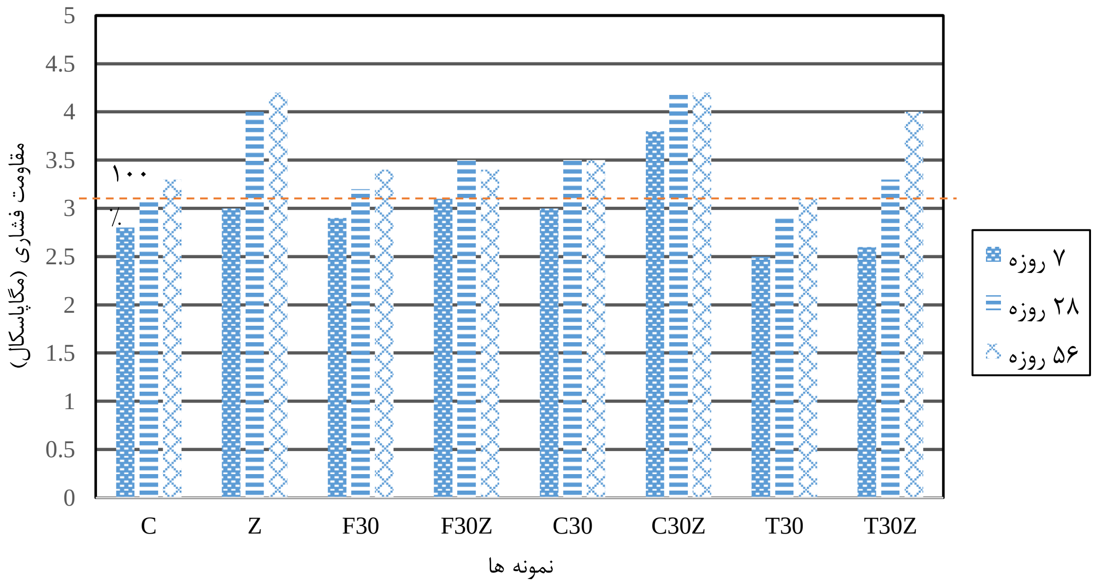
نتایج مقاومت کششی مربوط به مخلوط‌های حاوی ۳۰ درصد سنگدانه بازیافتی در شکل (٦) نشان داده شده است. برای نمونه با ۳۰ درصد درشت دانه بازیافتی (C30) در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی، ۱٥ درصد افزایش داشته است. با جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت با سیمان (نمونه C30Z)، حدود ۳٥ درصد افزایش مقاومت کششی نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است. برای نمونه با ۳۰ درصد ریزدانه بازیافتی (F30) مقاومت تقریبا یکسانی در کشش، نسبت به بتن معمولی به همراه داشته است. با اضافه کردن زئولیت به این نمونه (F30Z) مقاومت کششی، ۱٥ درصد از بتن معمولی بیشتر شده است؛ در نمونه‌های با ۳۰ درصد ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی (T30) در سن ۲۸ روز، کاهش ٦ درصدی در مقاومت کششی شکافتنی مشاهده شده است. مقاومت کششی نمونه T30Z نسبت به بتن معمولی، ٥ درصد افزایش داشته است.

جدول ٥ نتایج آزمایش مقاومت کششی شکافتنی

طرح	مقاومت کششی شکافتنی (مگاپاسکال)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	٥٦ روزه
C	۲,۸	۳,۱	۳,۳
Z	۳,۰	٤,۰	٤,۲
F15	۲,٦	۳,٥	٤,۰
F15Z	۳,۳	۳,٦	٤,۱
F30	۲,۹	۳,۲	۳,٤
F30Z	۳,۱	۳,٥	۳,٤
C15	۳,۳	۳,٦	۳,۹
C15Z	۳,٤	٤,٤	٤,۷
C30	۳,۰	۳,٥	۳,٥
C30Z	۳,۸	٤,۲	٤,۲
T15	۲,٦	۳,۱	۳,۲
T15Z	۲,۹	۳,۸	٤,۳
T30	۲,٥	۲,۹	۳,۱
T30Z	۲,٦	۳,۳	٤,۰

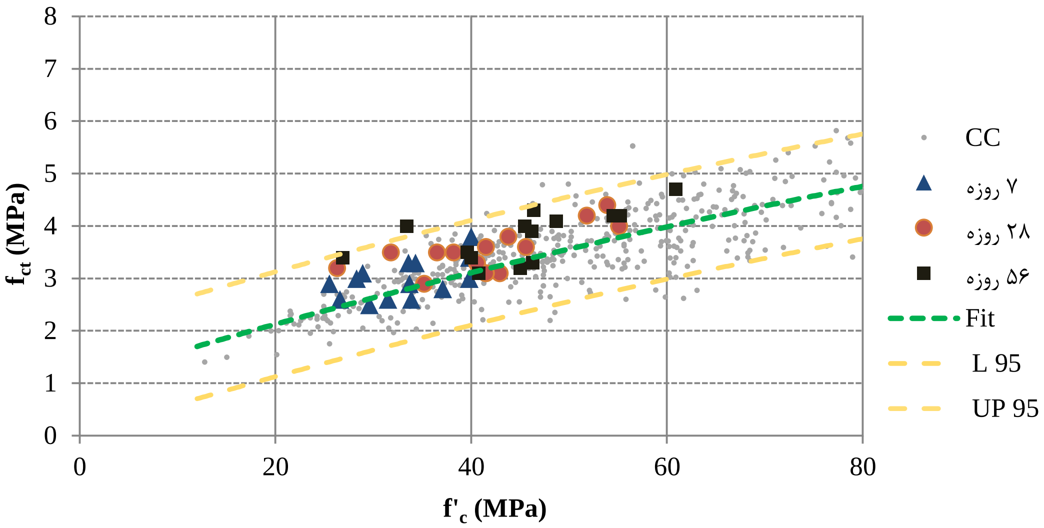


شکل ۵ مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد سنگدانه بازیافتی با نمونه‌های کنترل



شکل ٦ مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد سنگدانه بازیافتی با نمونه‌های کنترل

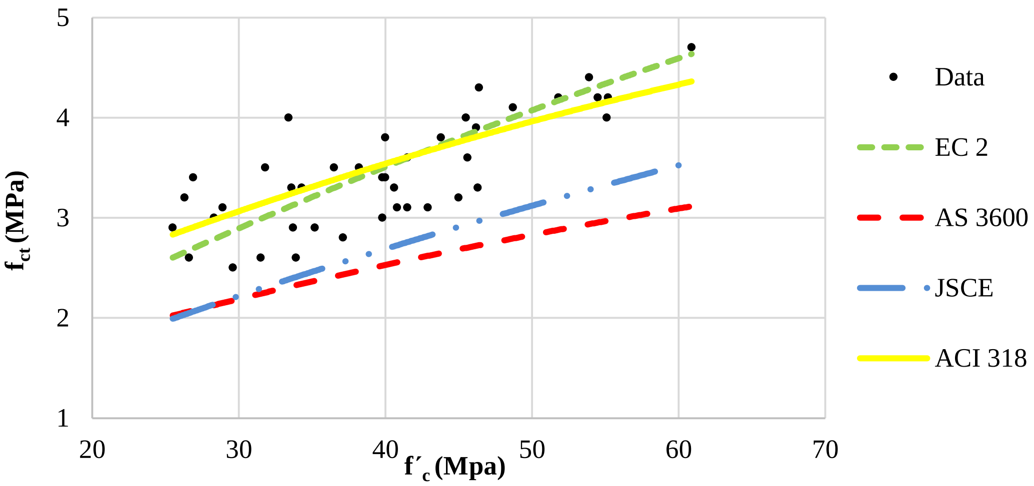
مقایسه مقاومت کششی شکافتنی تحقیق حاضر با بانک داده های مطالعات انجام شده گذشته. شکل (۷) نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت کششی شکافتنی بتن با سنگدانه‌های بازیافتی را با انبوه داده‌های مطالعات انجام شده‌گذشته بتن‌معمولی مقایسه می‌کند [20]. با تحلیل‌های آماری (رگرسیون‌غیرخطی) و با استفاده از نرم‌افزار Minitab17.1.0 [21] بر روی این داده‌ها منحنی‌های کران پایین و بالای ۹۵ درصد ترسیم شده است. بررسی‌های آماری نشان می‌دهند که ۹۸ ٪ داده های مقاومت کششی بتن بازیافتی، در محدوده ۹۵ ٪ داده‌های بتن معمولی قرار دارند.



شکل ۷ مقایسه مقاومت کششی بتن سنگدانه بازیافتی با بانک داده‌های بتن معمولی [20]

جدول ٦ روابط مقاومت کششی آیین نامه های مختلف

آیین نامه	رابطه
ACI 318 [22]	$f_{ct} = 0.56(f'_c)^{0.5}$
EC 2[23]	$f_{ct} = 0.3(f'_c)^{\frac{2}{3}}$
AS 3600 [24]	$f_{ct} = 0.4(f'_c)^{0.5}$
JSCE[25]	$f_{ct} = 0.23(f'_c)^{\frac{2}{3}}$



شکل ۸ مقایسه نتایج مقاومت کششی بتن بازیافتی با روابط آیین نامه ها

مقایسه مقاومت کششی بتن بازیافتی با روابط آیین نامه‌ها. در این بخش، مقاومت کششی دو نیم شدن (Tensile splitting strength)، با روابط آیین‌نامه‌های معتبر دنیا، نظیر آمریکا [22]، اروپا [23]، استرالیا [24] و ژاپن [25] مقایسه می‌شود. جدول (٦) روابط مقاومت کششی شکافتنی آیین‌نامه‌های مختلف دنیا را نشان می-دهد.

با توجه به شکل (۸) در بتن‌های بازیافتی مورد آزمایش، با ترسیم نمودار مقاومت کششی آیین‌نامه‌ها نسبت به مقاومت فشاری، روابط آیین‌نامه‌های استرالیا و ژاپن برای ۱۰۰ درصد داده‌های آزمایشگاهی محافظه کارانه می‌باشند (۱۰۰درصد داده‌های آزمایشگاهی، مقادیر مقاومت کششی بالاتری نسبت به روابط آیین‌نامه‌ها دارند). حدود ۵۰ درصد داده‌ها مقادیر کمتری نسبت به آیین‌نامه‌های آمریکا و اروپا داشته‌اند.

دوام

آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی بتن

با توجه به اینکه فرآیند خوردگی میلگرد فولادی در بتن یک فرآیند الکتروشیمیایی می باشد، لذا مقاومت ویژه الکتریکی بتن نقش قابل توجهی در میزان خوردگی دارد و می‌توان انتظار داشت که بتن‌های با مقاومت ویژه الکتریکی بالاتر عملکرد بهتری در خصوص کاهش میزان خوردگی میلگردهای فولادی از خودشان نشان می‌دهند. در این تحقیق آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی متر و در سنین ۷، ۲۸ و ۵٦ روز بر اساس استاندارد AASHTO T358-15 [26] انجام شده و نتایج آن در جدول (۷) ارائه شده است.

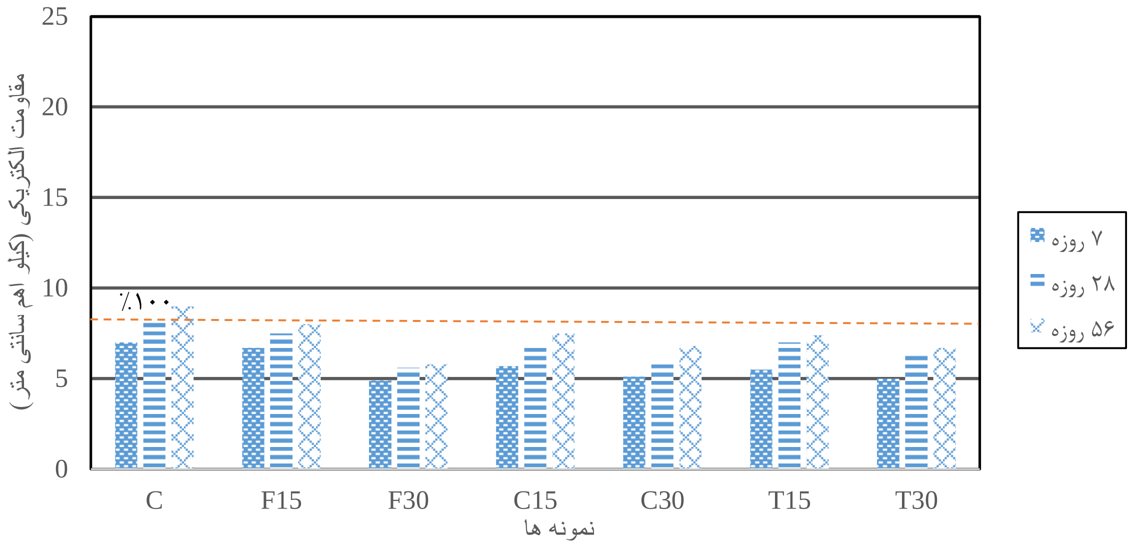
نتایج تاثیر سنگدانه بتن بازیافتی بر مقاومت ویژه الکتریکی بتن و مقایسه آن با بتن شاهد C در شکل (۹) ارائه شده است. در حالت استفاده از ریزدانه، برای نمونه های F15 و F30 در سن ۲۸ روز به ترتیب ۷ و ۳۰ درصد کاهش مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است. برای فاز درشت‌دانه بازیافتی نمونه‌های C15 و C30 به ترتیب ۱٤ و ۲۵ درصد کاهش نسبت به بتن C داشته‌اند.

در بخش بتن های بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه، برای نمونه‌های T15 و T30 به ترتیب حدود ۱۳ و ۲۲ درصد کاهش نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است.

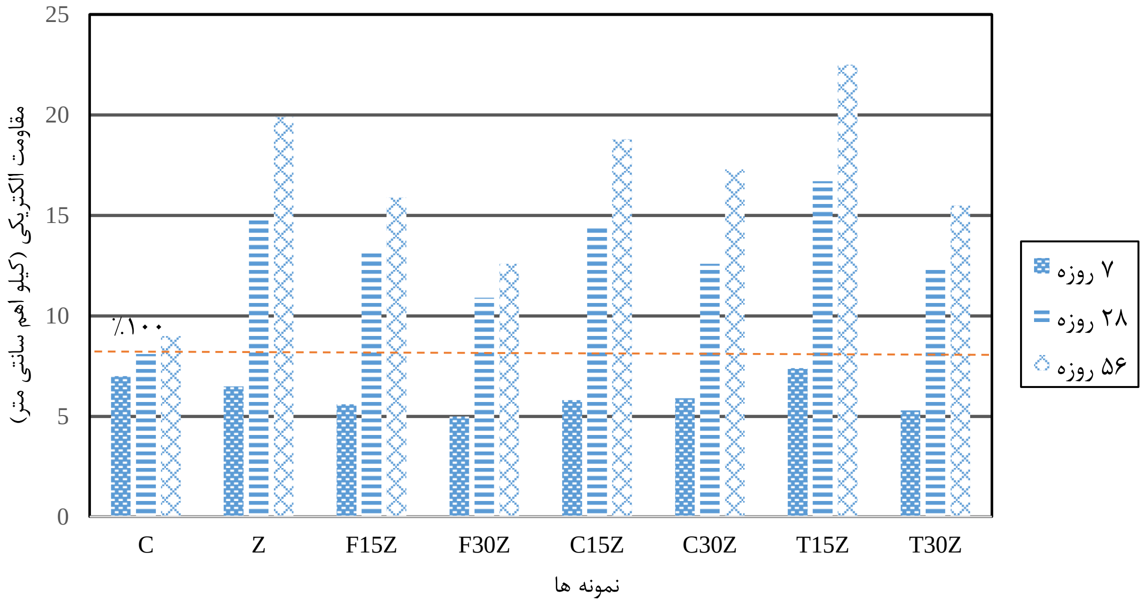
در شکل (۱۰) تاثیر کاربرد توام زئولیت و سنگدانه بتن بازیافتی بر مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط های بتن نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، مقاومت ویژه الکتریکی مخلوط بتن Z نسبت به بتن C، در سن ۲۸ روز، ۱/۸ برابر شده است. در بتن‌های با جایگزینی ریزدانه بازیافتی، بتن F15Z و F30Z در سن ۲۸ روز به ترتیب ٦٤ و ۳٤ درصد افزایش مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به بتن معمولی داشته‌اند. در بخش جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی، بتن های C15Z و C30Z به ترتیب ۷۷ و ۵۵ درصد افزایش نسبت به بتن C مشاهده شده است. همچنین برای نمونه‌های ریزدانه و درشت‌دانه بازیافتی، یعنی نمونه‌های T15Z و T30Z نیز، نسبت به بتن معمولی به ترتیب افزایش ۱۰٦ و ۵۰ درصدی داشته‌اند.

جدول ۷ نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی

طرح	مقاومت الکتریکی در سنین مختلف (کیلو اهم سانتی متر)		
	۷ روزه	۲۸ روزه	۵٦ روزه
C	۷,۰	۸,۱	۹,۰
Z	٦,۵	۱٤,۸	۱۹,۹
F15	٦,۷	۷,۵	۸,۰
F15Z	۵,٦	۱۳,۲	۱۵,۹
F30	٤,۹	۵,٦	۵,۸
F30Z	۵,۰	۱۰,۹	۱۲,٦
C15	۵,۷	٦,۹	۷,۵
C15Z	۵,۸	۱٤,٤	۱۸,۸
C30	۵,۱	٦,۰	٦,۸
C30Z	۵,۹	۱۲,٦	۱۷,۳
T15	۵,۵	۷,۰	۷,٤
T15Z	۷,٤	۱٦,۷	۲۲,۵
T30	۵,۰	٦,۳	٦,۷
T30Z	۵,۳	۱۲,۳	۱۵,۵



شکل ۹ نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه های بازیافتی



شکل ۱۰ نتایج آزمایش مقاومت ویژه الکتریکی نمونه های حاوی زئولیت

آزمایش نفوذ تسریع شده یون کلراید (RCMT)

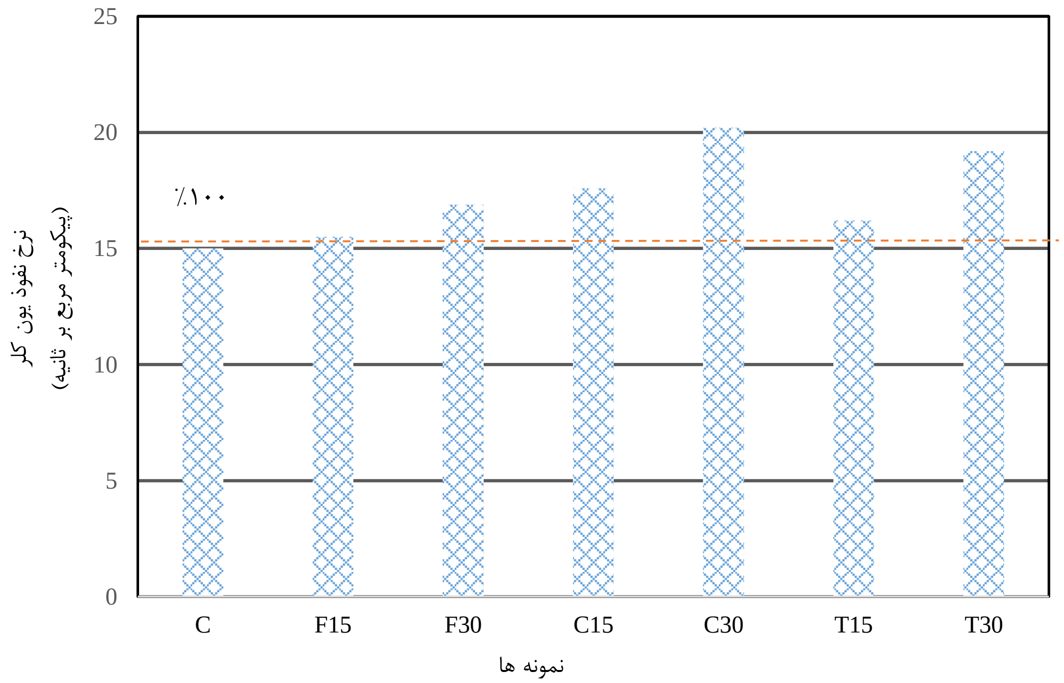
در آزمایش RCMT که طبق ا ستاندارد AASHTO TP 64-03 [27] و NT-BUILD492 [28] انجام گرفته است، عمق نفوذ یون کلر به داخل نمونه بتنی را تحت اختلاف ولتاژ الکتریکی ا ندازه گیری و میزان نفوذ یون کلر به داخل بتن محاسبه می‌گردد. بدیهی است که مقادیر بالاتر میزان نفوذ یون کلر نشانگر عملکرد ضعیف تر آن بتن در برابر نفوذ یون کلر می‌با شد. نتایج آزمایش RCMT نمونه ها، با توجه به اهمیت تخریبی یون کلر در سنین بالای بتن، برای سن ٥٦ روز در جدول (٨) ارائه شده است.

جدول ۸ نتایج آزمایش نفوذ یون کلر (RCMT)

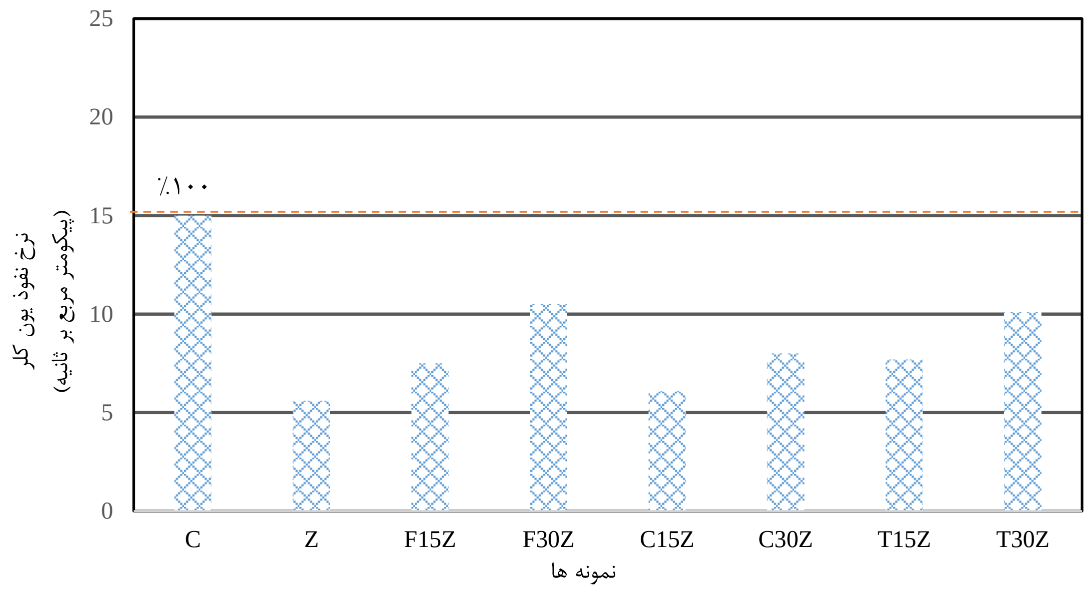
طرح	نرخ نفوذ یون کلر در بتن (پیکو متر مربع بر ثانیه)
	۵۶ روزه
C	۱۵,۰
Z	۵,۶
F15	۱۵,۵
F15Z	۷,۵
F30	۱۶,۹
F30Z	۱۰,۵
C15	۱۷,۶
C15Z	۶,۱
C30	۲۰,۲
C30Z	۸,۰
T15	۱۶,۲
T15Z	۷,۷
T30	۱۹,۲
T30Z	۱۰,۱

جهت امکان بررسی بهتر تاثیر کاربرد سنگدانه بتن بازیافتی و زئولیت بر روی ضریب نفوذ یون کلر در بتن، نتایج آزمایش RCMT بصورت نمودار در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) ارائه شده‌اند. شکل (۱۱) مقادیر نرخ نفوذ یون کلر برای نمونه بتن‌های ساخته شده از سنگدانه بازیافتی را نشان می‌دهد . در شکل (۱۱) مشخص است، در سن ۲۸ روز با کاربرد سنگدانه بازیافتی در بتن ریزدانه بازیافتی در درصدهای جایگزینی ۱۵ و ۳۰ (F30,F15) نسبت به بتن معمولی، به ترتیب ۳ و ۱۳ درصد افزایش یافته است.

در حالت استفاده از درشت‌دانه (C30,C15)، با همین درصدهای جایگزینی به ترتیب ۱۷ و ۳۵ درصد افزایش نرخ نفوذ و در بخش بتن‌های ریزدانه و درشت-دانه بازیافتی (T30,T15) نسبت به بتن معمولی به ترتیب ۸ تا ۲۸ درصد افزایش نرخ نفوذ داشته‌اند.



شکل ۱۱ بررسی سنگدانه بازیافتی بر نرخ نفوذ یون کلر در سن ۵۶ روز



شکل ۱۲ بررسی تاثیرتوام زئولیت و سنگدانه بازیافتی بر نرخ نفوذ یون کلر در سن ٥٦ روز

نتایج تاثیر زئولیت بر نفوذ یون کلر، و مقایسه آن با بتن شاهد C در شکل (۱۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج نمودار، در سن ۲۸ روز، افزودن ۱۰٪ زئولیت به مخلوط بتن، کاهش ٦۲ درصدی نرخ نفوذ یون کلر را به همراه داشته است. در بین نمونه‌های بازیافتی با زئولیت در حالت استفاده از ریزدانه ، در سن ۲۸ روز، ۳۰ تا ٥۰ درصد کاهش نفوذ یون کلر نسبت به بتن معمولی را به همراه داشته است (نمونه های F30Z, F15Z). در بخش درشت‌دانه بازیافتی (C30Z,C15Z)، کاهش نرخ نفوذ یون کلر از ٤٥ تا ٦۰ درصد نسبت به بتن معمولی مشاهده شده است. مقدار کاهش نفوذ یون کلراید نسبت به بتن C در بتن‌های بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه (T30Z, T15Z) ۳۳ تا ٤۸ درصد بوده است.

همانطور که از نتایج مشخص است، با افزایش درصد سنگدانه بازیافتی نرخ نفوذ یون کلر افزایش داشته است؛ نمونه حاوی سنگدانه بازیافتی درشت‌دانه نسبت به بتن‌های حاوی ریزدانه و ترکیب ریز و درشت‌دانه، نتایج قابل قبولی کسب کرده است.

بررسی رابطه نتایج مقاومت ویژه الکتریکی و نتایج نفوذ یون کلر (RCMT)

همانطور که در نتایج آزمایش‌های مقاومت ویژه الکتریکی و نفوذ یون کلر پیداست، نمونه هایی که مقاومت ویژه الکتریکی بالاتری داشتند، میزان نفوذ یون کلر در آنها کمتر بوده است. با افزایش مقاومت ویژه الکتریکی، نفوذ یون کلر کاهش یافته است. این نتایج، همخوانی آزمایش مقاومت الکتریکی و نفوذ یون کلر را تایید می‌کند. با توجه به نتایج و نمودارهایی که در بخش های قبلی ارائه شد، بیشترین مقاومت ویژه الکتریکی و کمترین مقدار نفوذ یون کلر مربوط به نمونه‌های حاوی زئولیت می‌باشد.

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، مشخصات مکانیکی و دوام بتن، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافتنی، مقاومت ویژه الکتریکی و نفوذ یون کلر (RCMT) نمونه‌های بتن حاوی زئولیت و سنگدانه بازیافتی بر روی ۲۸۰ نمونه مختلف بتن مورد بررسی قرار گرفته است و در ادامه به مهمترین نتایج بدست آمده از تحقیق حاضر اشاره می‌شود.

۱. حضور زئولیت در نمونه بتنی بدون مصالح بازیافتی، باعث افزایش حدود ۳۰ درصدی مقاومت فشاری و کششی شکافتنی، افزایش حدود ۸۰ درصدی در مقاومت ویژه الکتریکی و کاهش حدود ٦۰ درصدی نفوذ یون کلر در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی را در بردارد.

۲. استفاده از سنگدانه بازیافتی با افزایش درصد جایگزینی، باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شود؛ درحالت استفاده از مصالح بازیافتی ریزدانه تا ۳۸ درصد، برای درشت‌دانه بازیافتی تا ۱۵ درصد و در فاز ریزدانه و درشت‌دانه تا ۱۸ درصد کاهش مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز مشاهد شده است.

۳. با افزودن زئولیت به بتن‌های بازیافتی، ضعف مقاومت فشاری تا حدی جبران می‌شود. در حالت استفاده از ریزدانه تا ٦ درصد افزایش، در بخش درشت‌دانه تا ۲۰ درصد افزایش و درحالت استفاده از ریزدانه و درشت-دانه تا ۵ درصد کاهش مقاومت فشاری نسبت به بتن معمولی در سن ۲۸ روز به همراه داشته است.

٤. استفاده از سنگدانه بازیافتی در بتن در دو حالت درشت دانه و ریزدانه به صورت جداگانه، باعث افزایش تا ۱۵ درصد مقاومت کششی شکافتنی نسبت به بتن معمولی در هر دو درصد جایگزینی ۱۵ و ۳۰ برای سن ۲۸ روز شده است. استفاده از سنگدانه بازیافتی ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه تا ٦ درصد مقاومت کششی شکافتنی را نسبت به بتن معمولی کاهش داده است.

۵. با اضافه کردن زئولیت به نمونه‌های بتن با سنگدانه بازیافتی در حالت جایگزینی درشت‌دانه، تا ٤۰ درصد افزایش، ریزدانه تا ۱۵ درصد افزایش و ترکیب درشت‌دانه و ریزدانه تا ٦ درصد افزایش مقاومت کششی شکافتنی در سن ۲۸ روز نسبت به بتن معمولی را در بر داشته است.

٦. روابط مقاومت کششی شکافتنی آیین‌نامه‌های آمریکا و اروپا برای ۵۰ درصد داده‌های بتن بازیافتی و آیین-نامه ژاپن و استرالیا برای ۱۰۰ درصد داده‌ها محافظه-کارانه می‌باشند.

۷. با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها کاهش یافته‌اند. در حالت درشت‌دانه تا ۲۵ درصد، در بخش ریزدانه ۳۰ درصد و ترکیب ریز دانه و درشت‌دانه تا ۲۲ درصد کاهش مقاومت ویژه الکتریکی نسبت به بتن معمولی در سن ۲۸ روز داشته‌اند. با جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت به جای سیمان در این نمونه‌ها، برای بخش درشت‌دانه تا ۷۷ درصد، در حالت استفاده از ریزدانه تا ٦٤ درصد و در حالت استفاده از ترکیب ریزدانه و درشت‌دانه تا ۱۰٦ درصد افزایش مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روز مشاهده شده است.

۸. استفاده از سنگدانه بازیافتی در بتن افزایش نرخ نفوذ یون کلر در همه درصدهای جایگزینی را به همراه داشته است. برای حالت استفاده از درشت‌دانه تا ۳۵ درصد، بخش ریزدانه تا ۱۳ درصد و حالت استفاده از ریزدانه و درشت‌دانه تا ۲۸ درصد افزایش نفوذ یون کلر نسبت به بتن معمولی در سن ٥٦ روز به ثبت رسیده است. در نمونه‌های بازیافتی حاوی پوزولان زئولیت، برای نمونه‌های حالت استفاده از درشت‌دانه، ریز دانه و ترکیب ریز دانه و درشت‌دانه به ترتیب افزایش ۵۰، ٦۰ و ٤۸ درصدی نرخ نفوذ یون کلراید نسبت به بتن معمولی در سن ٥٦ روز مشاهده شده است.

۹. استفاده از ۱۵ درصد سنگدانه بازیافتی ترکیب ریز و درشت‌دانه و ۱۰ درصد زئولیت برای کسب نتایج مطلوب مشخصات مکانیکی و دوام بتن، به عنوان درصدهای بهینه پیشنهاد می‌گردد. استفاده از این

درصدهای بهینه جایگزینی زئولیت و سنگدانه بازیافتی به جای سیمان و سنگدانه طبیعی و تولید بتن‌های پرمقاومت و با دوام در جهت رسیدن به محیط زیستی پایدار و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی در پروژه ملی و خصوصی با اهمیت بالا، کاربرد دارد.

مراجع

1. Initiative, C. S., Recycling Concrete: Executive summary. World Business Council for Sustainable Development, http://www. wbcsdcement. org /pdf/CSI-Recycling Concrete-Summary. (accessed: 11/11. 15), (2009).
2. Gonzalez, G., Moo-Young, H., "Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate, FHWA State of the Practice National Review", *Washington DC: Federal Highway Administration*, *Vol.12*, pp. 1-47, (2004).
3. Meyer, C., "The greening of the concrete industry", *Cement and concrete composites,* Vol. 31, No.8, pp. 601-605, (2009).

۴. طالقانی، جعفر، " مسائل و مشکلات تولید سیمان های مخلوط (پوزولانی)"، انستیتوی استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، (۱۳۷۱).

5. Sabet, F. A., Libre, N. A., Shekarchi, M., "Mechanical and durability properties of self-consolidating high-performance concrete incorporating natural zeolite", *silica fume and fly ash. Construction and Building Materials,* Vol. 44, pp. 175-184, (2013).
6. 212, ACI Committee. 'Report on Chemical Admixtures for Concrete', American Concrete Institute (ACI 212.3R-10), Penetron International, East Setauket, NY, USA. (2010)
7. ISR 4977 1st.Revision, Aggregates - Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates -Test Method, (2015).
8. Saini, M., Goel, S., "Strength and Permeability of Recycled Aggregate Concrete Containing Silica Fumes", *International Journal of Innovative Research in Science,* Engineering and Technology (IJIRSET), Vol. 5, pp. 5-10, (2016).
9. Cartuxo, F., de Brito, J., Evangelista, L., Jiménez, J. R., Ledesma, E. F., "Increased durability of concrete made with fine recycled concrete aggregates using superplasticizers", *Materials,* Vol. 9, No.2, pp. 1-26, (2016).
10. Najimi, M., Sobhani, J., Ahmadi, B., Shekarchi, M., "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", *Construction and Building Materials,* Vol. 35, pp. 1023-1033, (2012).
11. Vaičiukynienė, Danutė, Gintautas Skipkiūnas. Vytautas Sasnauskas, and Mindaugas Daukšys, "Cement compositions with modified hydrosodalite", *chemija,* No. 3, Vol. 23, pp. 147-154, (2012).

12. Somna, R., Jaturapitakkul, C., Amde, A. M., "Effect of ground fly ash and ground bagasse ash on the durability of recycled aggregate concrete", *Cement and Concrete Composites,* Vol. 34, No.7, pp 848-854, (2012).
13. Nagrockiene, D., and Giedrius, G., "Research into the properties of concrete modified with natural zeolite addition", *Construction and Building Materials*, Vol. 113, pp. 964-969, (2016).
14. Eskandari, H., Mohammad, V., Kowsari, K., "Investigation of Mechanical and Durability Properties of Concrete Influenced by Hybrid Nano Silica and Micro Zeolite", *Procedia Materials Science*, Vol. 11**,** pp. 594-599, (2015).
15. ASTM C150/C150M-11, Standard Specification for Portland cement, ASTM International, West Conshohohocken, PA, (2011).
16. ASTM C29/C29M/17, Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate. ASTM International, West Conshohohocken, PA, (2011).
17. ACI Committee 211. Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete (ACI 211.2-91). American Concrete Institute, (1992).
18. ASTM C39-11. Standard Specification for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohohocken, PA, (2011).
19. ASTM C496/C496M-11. Standard Specification for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohohocken, PA, (2011).
20. http://bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/index.html
21. Minitab 17 Statistical Software [Computer software]. Incorporation, Minitab
22. American Concrete Institute ACI Committee, "Building code requirements for structural concrete ACI 318-08 and commentary 318R-08 "Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute, (2008).
23. European Committee for Standardization. Eurocode No. 2, "Design of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Buildings", (2005).
24. Standards Australia, "Concrete structures", AS 3600, Sydney, Australia, (2009).
25. Japan Society of Civil Engineers, "Standard Specification for Concrete Structure", Japanese Society of Civil Engineering No. 15, Tokyo, Japan, (2005).
26. AASHTO T358-15, "Standard method of test for surface resistivity Indication of concretes Ability to resist chloride Ion penetration", AASHTO, (2006).
27. AASHTO TP 64-03, "Standard Method of Test for predicting chloride penetration of hydraulic cement concrete by the rapid migration procedure".
28. Nordtest, C., "Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments (NT BUILD 492)", Taastrupl, Denmark, (1999).